

慧眼-HXMT观测到的黑洞双星系统中的W-K关系*

马宾远^{1,2†} 杨孜旭^{1,2} 廖进元² 屈进禄^{1,2}

(1 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 通过几十年的观测研究, 黑洞X射线双星(X-Ray Binary, XRB)部分特征被揭示. 然而, 吸积盘结构尚不确定. 黑洞XRB功率密度谱的截断频率与准周期振荡(Quasi Periodic Oscillation, QPO)的相关性质(W-K关系)可以限制吸积盘结构. 利用慧眼-HXMT (Hard X-ray Modulation Telescope)观测到的5个黑洞XRB的数据, 对黑洞XRB的W-K关系进行了研究, 结果表明在慧眼-HXMT观测的3个探测器能段中W-K关系成立. 此外在MAXI J1535-571之中存在截断频率和吸积盘内半径的相关关系, 这和截断的吸积盘结构一致. 如果观测到的功率密度谱来自质量吸积率的扰动传播, 可以推测吸积盘内半径接近最内圆形稳定轨道, 此黑洞可能是高自旋系统.

关键词 X射线: 双星, 相对论过程, 吸积盘, 辐射机制: 普通

中图分类号: P113; **文献标识码**: A

1 引言

X射线双星系统(X-Ray Binary, XRB)通常是由一个致密天体和一个伴星组成, 根据伴星质量的大小可以分为小质量X射线双星(Low-Mass X-ray Binary, LMXB)和大质量X射线双星(High-Mass X-ray Binary, HMXB)系统. 根据XRB中的致密天体可以分为黑洞X射线双星(Black Hole X-Ray Binary, BHB)、中子星X射线双星等. 由于伴星物质被中心致密天体吸积, 其引力势能通过物质的相互作用转化为辐射能, 主要辐射能段在X射线波段. 洛希瓣的吸积会在中心致密天体附近形成吸积盘^[1]. 黑洞小质量X射线双星大多是暂现源, 他们多数时间处于宁静态(总辐射光

度 $L_X < 10^{31} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$), 有时候由于吸积流的热不稳定性导致源产生亮的爆发现象.

黑洞暂现源爆发的演化随着光度的变化而表现出不同的谱态(spectral state)^[2], 其能谱成分很复杂, 但辐射能谱通常简单地划分为两部分, 来自吸积盘的热谱成分和热内流(冕)的非热谱成分. 在爆发的开始阶段, 源通常处于非热辐射成分主导的低硬态(Low Hard state, LHS), 能谱幂律指数 $\gamma \sim 1-1.7$, 能谱在100–200 keV处截断. 随着物质吸积率的增加, 热谱成分逐渐增强, 源演化进入中间态(Intermediate state, IMS). 基于能谱和时变性质, 我们可以进一步将IMS划分为硬中间态(Hard Intermediate state, HIMS)和软中间态(Soft Inter-

2023-02-02收到原稿, 2023-03-15收到修改稿

*国家重点研发计划(2021YFA0718500)资助

[†]mabinyuan@ihep.ac.cn

mediate state, SIMS)^[3]. 随着光度的进一步增加, 当热成分主导源的辐射时, 源进入了高软态 (High Soft state, HSS), 在高软态源的 γ 一般大于2, 且一般认为吸积盘内半径处于最内稳定圆形轨道 (Innermost Stable Circular Orbit, ISCO)^[4]. 在爆发结束时, 源经历中间态返回低硬态, 或者宁静态^[5]. 黑洞LMXB的一次完整的爆发过程, 也可以用硬度-强度图 (Hardness-Intensity Diagram, HID) 进行体现, 其中硬度是高能段光子计数率和低能段光子计数率的比率. 对于典型黑洞LMXB的一次爆发过程, 源的演化在HID图上面呈现出一个逆时针的q形状. 基于爆发在HID的位置, 也可以将爆发按照前述分成4个谱态: 低硬态、硬中间态、软中间态和高软态. 同时也展示了谱态在爆发过程中的演化, 理论研究倾向于认为这种变化是由于吸积盘的截断半径向内移动和吸积率的增加引起的^[2].

黑洞X射线双星表现出广泛的长时标的能谱状态变化和短时标时变现象. 对黑洞暂现源的时变研究发现, 准周期振荡 (Quasi Periodic Oscillation, QPO) 普遍存在于黑洞LMXB. QPO在功率密度谱 (Power Density Spectrum, PDS) 上表现为窄的峰值, 其他部分被称为宽带噪声. QPO分为低频QPO和高频QPO, 低频QPO又可以通过PDS图上形状、均方根 (Root Mean Square, RMS)、品质因子和时间延迟等性质分为A、B和C这3类^[6-9], 我们一般用rms直接代表“相对RMS”. 其中C型QPO伴随着平台形状的低频噪声成分 (称之为带限噪声), 这一类型QPO出现于硬态和硬中间态. 通过比较黑洞和中子星LMXB的QPO现象, 人们认为, 它们可能具有相似的物理起源^[6, 10-12]. 对于本文没有详细涉及的其他类型QPO, 可以参考Motta等^[9]、Wijnands等^[6]、Psaltis等^[10]、Belloni等^[11]的工作.

对于X射线双星中的低频准周期振荡 (Low Frequency Quasi Periodic Oscillation, LFQPO) 进行了广泛研究后, 提出了多个模型来解释它们的起源^[13-14]. 这些模型一般分为吸积的几何和物理模

型, 现在有越来越多的观测证据支持C型QPO来自热内流相对论进动模型中的L-T进动 (Lense-Thirring precession)^[13, 15-16]. L-T相对论进动模型最初被Stella等^[17]用来解释中子星LMXB中的QPO现象, 在此之后由Ingram等^[13]将其应用在黑洞XRB之中^[15-16]. 在此模型中, 处于吸积盘的截断半径之内的热内流受黑洞强引力场和自旋的影响产生相对论进动, 即观测到的低频QPO现象.

通过对时变性质的研究发现, 黑洞和中子星LMXB的QPO中心频率与噪声特征截断频率在对数坐标图上呈线性正相关, 且两类天体遵循相同的规律, 这一关系被Wijnands和van der Klis^[6]发现, 简称为W-K关系. W-K关系表明, 在所有这些不同类型的源中, 带限噪声和QPO是由相同的物理机制产生的. 它很可能仅与内部的吸积流的不稳定性有关, 而与致密天体的质量与磁场无关. 这表明黑洞和中子星附近吸积流可能遵循相似的物理规律, 同时也为研究致密天体吸积流的运动规律提供了途径.

慧眼-HXMT (Hard X-ray Modulation Telescope) 卫星自2017年发射以来, 已成功对黑洞暂现源进行了广泛观测. 本文使用了慧眼-HXMT在2017—2020年间观测的5个典型黑洞暂现源的数据, 研究了其时变性质. 慧眼-HXMT的宽能带特征 (1–250 keV) 可以让我们在更宽的能量范围研究黑洞暂现源的能谱和时变性质. 我们的研究将W-K关系拓展到120 keV的能段, 并对截断盘的模型做出限制.

2 数据处理

慧眼-HXMT是中国在2017年6月15日成功发射的第一颗X射线天文望远镜^[18]. 慧眼-HXMT由3个准直望远镜组成: 高能X射线望远镜 (HE)^[19]、中能X射线望远镜 (ME)^[20] 和低能X射线望远镜 (LE)^[21], 具有能段宽、有效面积大、时间分辨率高等特点, 适用于黑洞时变和能谱性质研究. 慧眼-HXMT基本参数可见表1.

表 1 慧眼-HXMT 3个探测器的参数
Table 1 Parameters of the three payloads of *Insight*-HXMT

Detector	LE	ME	HE
Geometrical area/cm ²	384	952	5100
Energy band/keV	1–12	8–35	20–350
Time resolution/ μ s	1000	240	4
Energy resolution	2.5% @ 6 keV	15% @ 20 keV	\leq 17% @ 60 keV

为了探究黑洞双星的时变性质, 我们使用了慧眼-HXMT对5个黑洞双星(MAXI J1535-571、GX 339-4、MAXI J1348-630、MAXI J1631-479和GRS 1915+105)的观测数据, 根据已有的工作^[22–26]对源的数据分析和谱态划分, 我们仅选取了有明确C型QPO的LHS和SIMS的观测号(表2–4), 表中从左到右分别是: 观测号(ObsID), 时间(MJD), 低频截断频率(ν_b), 高频截断频率(ν_h), QPO频率(ν_{QPO}), 其中有些观测号在某一能段上有缺失. 我们用慧眼-HXMT数据分析软件(HXMTDAS v2.04¹)对表2–4中所有数据进行分析, 各项参数使用软件默认值: (1)指向偏移角(offset angle of the pointing direction) $< 0.04^\circ$; (2)仰角(earth elevation of FOV center position, ELV) $> 10^\circ$; (3)地磁截止刚度(geomagnetic cut-off rigidity, COR) > 8 GV.

对高能天体辐射的时变分析, 通常采用傅里叶分析方法计算光变曲线的功率密度、时延和相关系数等频域特征量^[11, 27]. 在这里我们使用powspec软件进行功率密度谱的计算, 设定PDS由128 s的时间间隔(interval)产生, 时间并(bin)为1/128 s, 即Nyquist频率为64 Hz. 然后对全部间隔的PDS进行平均, 得到每个观测号的PDS, 并在减去泊松噪声后进行Miyamoto归一化^[28]. 死时间效应在LE、HE可以忽略. ME的死时间处理方法参考Huang等人的工作^[22]. 为增加PDS的信噪比, 观测时间小于640 s的数据被忽略, 同时, QPO频率相近(中心

频率差异小于QPO的半高全宽)且时间相近的观测被合并计算PDS. 在我们所选择HXMT观测源中, MAXI J1535-571、GX 339-4、MAXI J1348-630、MAXI J1631-479和GRS 1915+105分别有10, 2, 8, 3, 3个有效观测号(表2–4).

如引言部分所述, LHS和HIMS的PDS由宽带噪声和QPO构成. 我们选择使用XSPEC v12.12.1^[29], 按照Wijnands等^[6]拟合PDS的方式, 使用Lorentz模型拟合QPO及其谐频成分、使用bknpow或者bkn2pow两种模型拟合噪声成分, 得到QPO频率和宽带噪声截断频率. 拟合频率范围是0.01–64 Hz. 图1展示了两个典型例子, 上图是观测号P0114535005的ME观测的PDS, 在其宽带噪声上可以看到一个明显的截断, 我们用bknpow进行拟合, 得到截断频率 ν_b ; 下图是观测号P0114535005的ME观测的PDS, 用bkn2pow进行拟合, 可以得到两个截断频率 ν_b 和 ν_h . XSPEC的“error”命令给出各个参数的误差, 默认的置信度为90%, 如表2–4中截断频率和QPO频率参数的误差. 对于本文处理的观测号, 低硬态的 ν_b 一般为0.04–0.4 Hz, 而在硬中间态可以达到 ~ 1 –2 Hz. Lorentz模型的中心频率就是QPO的频率 ν_{QPO} . XSPEC在拟合完成后还可以给出拟合的约化 χ^2 值(反映了拟合的优劣, 越接近1则拟合越好), 我们的拟合中约化 χ^2 值小于1.5 (自由度为186), 大多数在1.2左右, 可见拟合效果较好. 我们使用XSPEC的命令“flux”估计2–120 keV的不同能量段的低频噪声成分的rms.

¹<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/software.jhtml>

表 2 慧眼-HXMT的LE观测到的5个BHB在2–10 keV能段的PDS拟合得到的结果
Table 2 The PDS fitting results of five BHBs observed by *Insight*-HXMT/LE in 2–10 keV

ObsID	MJD	$\nu_{b,LE}/\text{Hz}$	$\nu_{h,LE}/\text{Hz}$	$\nu_{QPO,LE}/\text{Hz}$
MAXI J1535-571				
P011453500108	58002.734	0.26 ± 0.02	4.34 ± 0.24	1.31 ± 0.02
P011453500144	58008.444	0.43 ± 0.05	9.02 ± 0.65	2.61 ± 0.01
P011453500145	58008.583	0.30 ± 0.02	10.31 ± 0.97	2.60 ± 0.01
P011453500301	58011.200	0.36 ± 0.05	8.09 ± 0.68	2.12 ± 0.01
P011453500401	58012.260	0.34 ± 0.03	8.45 ± 1.28	2.75 ± 0.01
P011453500501	58013.255	0.45 ± 0.03	14.53 ± 3.17	3.35 ± 0.01
P011453500601	58014.117	0.63 ± 0.04	9.27 ± 1.86	3.30 ± 0.01
P011453500901	58015.974	1.48 ± 0.05	** ^a	8.74 ± 0.03
P011453500902	58017.250	1.73 ± 0.05	**	9.00 ± 0.03
P011453500903	58017.389	1.45 ± 0.05	**	7.74 ± 0.05
GX 339-4				
P0304024035	59295.758	0.12 ± 0.13	**	0.64 ± 0.01
P0304024036	59297.017	0.11 ± 0.03	1.33 ± 0.12	0.93 ± 0.01
MAXI J1348-630				
P0214002002	58511.314	0.02 ± 0.01	5.49 ± 0.28	0.39 ± 0.01
P0214002003	58512.308	0.11 ± 0.01	5.96 ± 0.27	0.54 ± 0.00
P0214002004: 01-08 ^b	58513.303	0.16 ± 0.01	6.26 ± 0.19	0.71 ± 0.06
P0214002004: 09-19	58514.411	0.12 ± 0.01	7.08 ± 0.25	0.86 ± 0.02
P0214002005	58516.818	0.22 ± 0.01	12.19 ± 0.51	1.25 ± 0.01
P0214002006	58518.012	0.36 ± 0.04	4.57 ± 0.31	2.81 ± 0.05
P0214002007	58519.145	0.56 ± 0.03	2.78 ± 0.09	3.82 ± 0.04
P0214002008	58519.804	0.44 ± 0.16	2.97 ± 0.27	3.37 ± 0.12
MAXI J1631-479				
P0214003002	58525.973	0.84 ± 0.06	**	4.85 ± 0.05
P0214003003	58527.1	1.19 ± 0.40	13.75 ± 1.70	6.21 ± 0.09
P0214003008	58534.787	4.73 ± 0.36	**	6.78 ± 0.35
GRS 1915+105				
P0101330006	58216.956	1.31 ± 0.13	9.60 ± 1.21	3.67 ± 0.02
P0101330007	58218.216	0.52 ± 0.18	**	4.20 ± 0.04
P0101330009	58220.272	1.15 ± 0.23	**	3.39 ± 0.02

^a ** represent the PDS does not have this noise component in fitting.

^b The number behind the colon represents the exposure ID in this observation.

表 3 慧眼-HXMT的ME观测到的5个BHB在10–20 keV能段的PDS拟合得到的结果
Table 3 The PDS fitting results of five BHBs observed by *Insight*-HXMT/ME in 10–20 keV

ObsID	MJD	$\nu_{b,ME}/\text{Hz}$	$\nu_{h,ME}/\text{Hz}$	$\nu_{QPO,ME}/\text{Hz}$
MAXI J1535-571				
P011453500108	58002.734	0.26 ± 0.01	5.70 ± 0.30	1.30 ± 0.02
P011453500144	58008.444	0.61 ± 0.08	14.24 ± 1.96	2.58 ± 0.01
P011453500145	58008.583	0.53 ± 0.04	12.07 ± 1.36	2.62 ± 0.01
P011453500301	58011.200	0.28 ± 0.03	6.23 ± 0.27	2.07 ± 0.00
P011453500401	58012.260	0.36 ± 0.03	9.02 ± 0.37	2.76 ± 0.00
P011453500501	58013.255	0.43 ± 0.05	7.39 ± 0.35	3.37 ± 0.01
P011453500601	58014.117	0.82 ± 0.06	6.86 ± 0.26	3.35 ± 0.01
P011453500901	58015.974	1.58 ± 0.04	** ^a	9.05 ± 0.01
P011453500902	58017.250	1.70 ± 0.05	**	9.28 ± 0.01
P011453500903	58017.389	**	**	**
GX 339-4				
P0304024002	59264.083	0.42 ± 0.03	**	1.42 ± 0.06
P0304024036	59297.017	0.05 ± 0.04	**	0.95 ± 0.01
MAXI J1348-630				
P0214002002	58511.314	0.05 ± 0.01	6.73 ± 0.39	0.39 ± 0.01
P0214002003	58512.308	0.13 ± 0.01	7.36 ± 0.28	0.57 ± 0.02
P0214002004: 01-08 ^b	58513.303	0.13 ± 0.01	7.73 ± 0.18	0.74 ± 0.01
P0214002004: 09-19	58514.411	0.17 ± 0.01	**	0.87 ± 0.01
P0214002005	58516.818	0.22 ± 0.02	12.19 ± 0.52	1.26 ± 0.01
P0214002006	58518.012	0.35 ± 0.05	3.57 ± 0.27	1.39 ± 0.02
P0214002007	58519.145	0.72 ± 0.12	5.73 ± 0.20	3.69 ± 0.01
P0214002008	58519.804	0.15 ± 0.11	5.72 ± 0.26	3.4 ± 0.01
MAXI J1631-479				
P0214003002	58525.973	1.37 ± 0.37	**	4.99 ± 0.03
P0214003003	58527.1	1.80 ± 0.54	10.24 ± 0.80	6.20 ± 0.05
P0214003008	58534.787	1.70 ± 0.97	**	6.63 ± 0.08
GRS 1915+105				
P0101330006	58216.956	0.45 ± 0.03	**	3.72 ± 0.03
P0101330007	58218.216	0.65 ± 0.04	**	4.32 ± 0.13
P0101330009	58220.272	0.27 ± 0.06	**	3.45 ± 0.03

^a ** represent the PDS does not have this noise component in fitting.

^b The number behind the colon represents the exposure ID in this observation.

表 4 慧眼-HXMT的HE观测到的5个BHB在20–120 keV能段的PDS拟合得到的结果
 Table 4 The PDS fitting results of 5 BHBs observed by *Insight*-HXMT/HE in 20–120 keV

ObsID	MJD	$\nu_{b,HE}/\text{Hz}$	$\nu_{h,HE}/\text{Hz}$	$\nu_{QPO,HE}/\text{Hz}$
MAXI J1535-571				
P011453500108	58002.734	0.49 ± 0.22	** ^a	1.50 ± 0.03
P011453500144	58008.444	0.51 ± 0.18	7.87 ± 0.51	2.56 ± 0.01
P011453500145	58008.583	0.36 ± 0.05	8.09 ± 0.28	2.59 ± 0.01
P011453500301	58011.200	0.28 ± 0.12	8.00 ± 0.57	2.02 ± 0.01
P011453500401	58012.260	0.29 ± 0.06	9.96 ± 0.43	2.76 ± 0.00
P011453500501	58013.255	0.51 ± 0.17	12.02 ± 0.56	3.34 ± 0.01
P011453500601	58014.117	0.90 ± 0.43	7.07 ± 1.17	3.34 ± 0.01
P011453500901	58015.974	1.75 ± 0.14	**	9.19 ± 0.02
P011453500902	58017.250	1.68 ± 0.15	**	9.36 ± 0.01
P011453500903	58017.389	1.85 ± 0.35	**	8.80 ± 0.04
GX 339-4				
P0304024015	59274.754	0.29 ± 0.02	**	1.89 ± 0.03
P0304024035	59295.758	0.04 ± 0.03	**	0.64 ± 0.01
MAXI J1348-630				
P0214002002	58511.314	0.08 ± 0.02	6.39 ± 0.26	0.4 ± 0.01
P0214002003	58512.308	0.11 ± 0.01	7.07 ± 0.24	0.53 ± 0.01
P0214002004: 01-08 ^b	58513.303	0.15 ± 0.01	8.95 ± 0.25	0.76 ± 0.01
P0214002004: 09-19	58514.411	0.2 ± 0.01	11.84 ± 0.31	0.88 ± 0.01
P0214002005	58516.818	0.3 ± 0.03	14.4 ± 0.99	1.32 ± 0.02
P0214002006	58518.012	0.95 ± 0.07	4.08 ± 0.07	1.38 ± 0.01
P0214002007	58519.145	0.61 ± 0.14	7.68 ± 0.20	3.6 ± 0.01
P0214002008	58519.804	0.2 ± 0.04	6.69 ± 0.17	3.42 ± 0.01
MAXI J1631-479				
P0214003003	58527.1	**	19.37 ± 2.77	6.29 ± 0.08
P0214003008	58534.787	**	20.19 ± 3.749	6.27 ± 0.08
GRS 1915+105				
P0101330006	58216.956	0.45 ± 0.02	**	3.66 ± 0.04
P0101330007	58218.216	1.03 ± 0.08	**	3.96 ± 0.55
P0101330009	58220.272	0.32 ± 0.03	**	3.49 ± 0.03

^a ** represent the PDS does not have this noise component in fitting.

^b The number behind the colon represents the exposure ID in this observation.

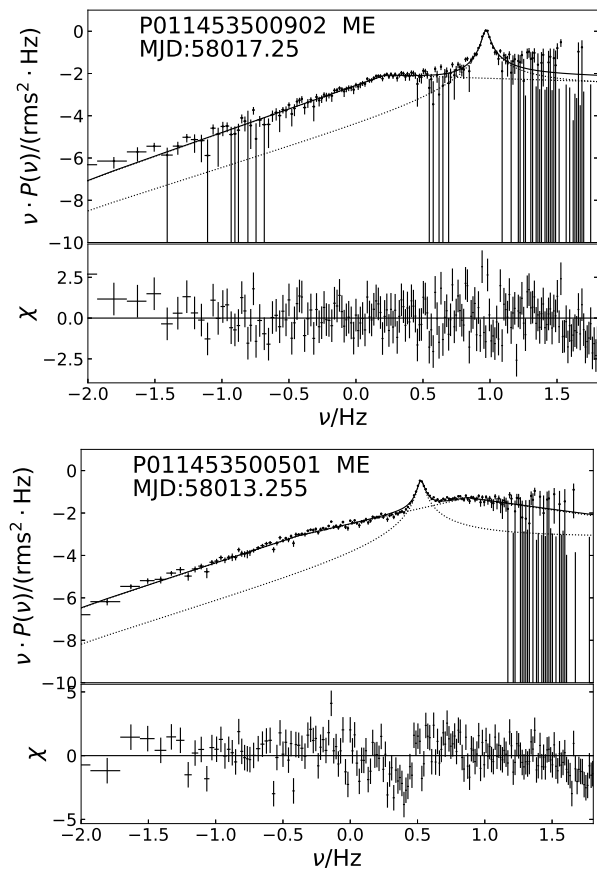


图 1 两个分别用XSPEC模型bknpow (上)和bkn2pow (下)拟合噪声的PDS

Fig. 1 Two PDS in which the noise is fitted with the XSPEC model of bknpow (top) and bkn2pow (bottom), respectively.

3 结果

基于上一章的数据处理, 我们分别计算每个源在3个探测器能段的PDS, 拟合结果列于表2-4. 把MAXI J1535-571、GX 339-4、MAXI J1348-630、MAXI J1631-479和GRS 1915+105 5个源不同能段的截断频率和QPO频率, 也即 ν_b 与 ν_{QPO} 的关系合并于图2. 图2中也选取了Wijnands等^[6]的结果中黑洞的数据, 方便与我们的结果比较. 从图2可以看到慧眼-HXMT的3个能段和Wijnands的数据的比较并验证W-K关系, HXMT观测到的数据点分布在拟合线周围, 离散度有一些增加. 特别是HE, 其数据点向下偏离Wijnands等^[6]的数据. 从图2中可以看

出X射线双星的 ν_b 与 ν_{QPO} 之间存在幂律关系, 对于所研究的观测数据, 我们利用 $\nu_{\text{QPO}} = n\nu_b^k$ (n 和 k 都是此幂律函数的参数)拟合不同能段的W-K关系曲线. 考虑截断频率和QPO频率的误差, 拟合出的参数分别为LE: $n = 3.72 \pm 0.19$, $k = 0.69 \pm 0.07$; ME: $n = 5.61 \pm 0.50$, $k = 0.95 \pm 0.15$; HE: $n = 6.08 \pm 0.60$, $k = 0.94 \pm 0.12$; Wijnands等^[6]的历史数据拟合参数: $n = 5.33 \pm 0.17$, $k = 0.88 \pm 0.07$. 拟合结果也显示在图2. 定性上, 慧眼-HXMT观测数据和原本的W-K关系基本一致. 定量上, W-K关系离散性的增加以及拟合参数的差别可能和观测数据信噪比有关, 例如, 慧眼-HXMT 3个探测器较短的曝光时间, 以及相较于Wijnands等^[6]使用的探测器(例如RXTE, Rossi X-ray Timing Explorer)更小的低能和中能探测器的有效面积; 另一个可能性是在慧眼-HXMT观测数据的PDS上并不能很好地区分不同成分, 例如, MAXI J1820+070在LHS的PDS上的噪声成分需要分成好几部分来分析^[30-31]; 另外, QPO频率和截断频率的关系可能存在本征的离散性, 例如, W-K关系的数据点在atoll源的样本中离散性增加, 而Z源则完全偏离W-K关系^[6, 32-33]. 因此, 尚需要更多源、更好质量的观测数据验证W-K关系的普适性.

为了演示截断频率与能量的相关性, 图3展示了MAXI J1535-571源宽带噪声的高频截断频率 ν_h 、低频截断频率 ν_b 随能量的变化. 结果表明, ν_b 对能量并没有显著的依赖性, 这和MAXI J1820+070所发现现象不是很一致, 可能和观测数据信噪比相关. 与之相反, ν_h 在20 keV以上随着能量增加有增加的趋势. 需要说明的是, 慧眼-HXMT不同探测器的能量范围具有重叠. 在这些重叠的能段, 不同探测器由于有效面积和本底水平的不同而得到不同信噪比的探测结果, 我们在此处以及后面的分析中仅保留信噪比高的结果.

为展示快速时变幅度随能量的变化, 选用典型源MAXI J1535-571的低频宽带噪声成分的rms随能量变化示于图4. 在低能段时宽带噪声rms保持接近常数, 但在高能段有随能量增加而下降的趋势, 此结果和一般黑洞LMXB的一致^[34].

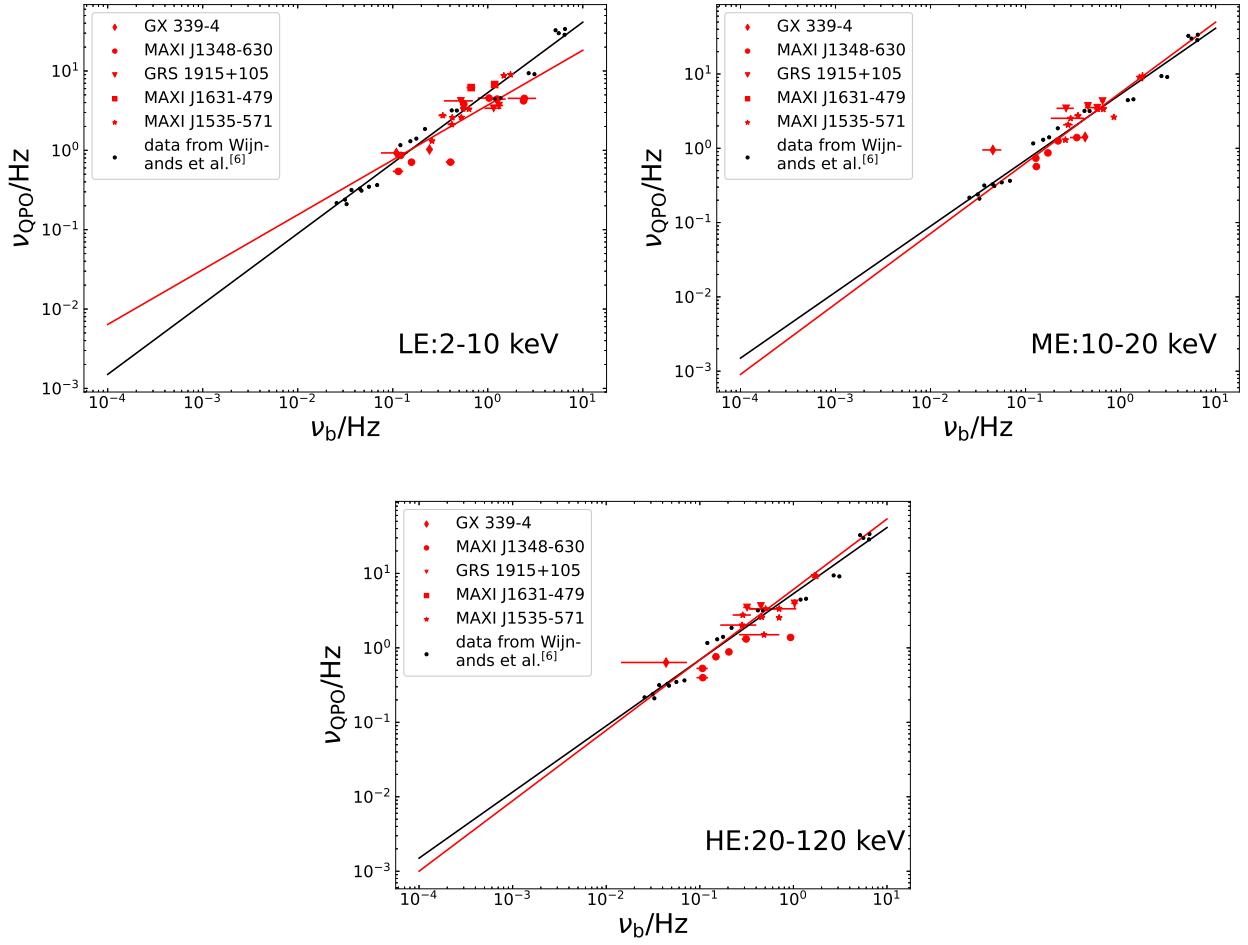


图 2 从LE、ME和HE观察到的5个BHB (红色符号)的低频截断频率与QPO频率的关系. 黑色数据点取自Wijnands等^[6], 对应的线性拟合均为实线, 以便进行比较.

Fig.2 Correlation between low break frequency and QPO frequency of 5 BHBs (red symbols) from the observation of LE, ME and HE. The data (black points) are from Wijnands et al.^[6]. The corresponding linear fittings are all solid lines shown for comparison.

4 讨论

本文利用慧眼-HXMT对5个黑洞暂现源的观测数据研究其时变性质以及其对吸积过程物理模型的限制.

4.1 W-K关系与其能量依赖性

总体上来看, 本文研究的5个黑洞服从传统的W-K关系, 仅在离散度上略有增加; 不同能段W-K关系略有差别, 主要是由于截断频率的移动, 这些需要新的观测数据进一步研究.

在RXTE时代, 人们发现不同类型的X射线双星暂现源虽然具有不同的X射线能谱, 但是PDS的形状相似, 宽带噪声截断频率和QPO频率关系遵从相似的规律. 然而, RXTE仅能研究窄能段(3–30 keV)的快速时变性质. 最近研究结果显示, 在PDS上的不同成分是能量的函数. Kawamura等^[30]利用中子星内部组成探测器(Neutron Star Interior Composition Explorer, NICER)研究了MAXI J1820+070的噪声的能量依赖性, 他们发现在0.5–10 keV范围内宽带噪声的截

断频率随能量而增加; Yang等^[31]利用HXMT宽能带观测数据研究了MAXI J1820+070的PDS, 发现在高能段的PDS的截断频率也是光子能量的函数, 且频率随能量增加. 我们对5个黑洞PDS的研究结果表明, 虽然离散度较大且截断频率在每个探测器中都出现了随着能量提升而增加的现象, 但在不同能段的线性关系近似保持不变且与Wijnands等^[6]一致. 这表明, 在我们研究的观测数据信噪比水平和探测器精度上, 截断频率虽然有能量依赖性但并没有显著改变W-K关系.

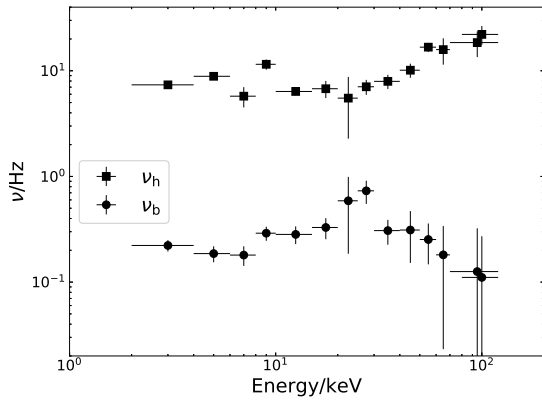


图3 MAXI J1535-571中 ν_b 和 ν_h 与能量的关系(观测号: P0114535003)

Fig. 3 The correlation between ν_b , ν_h and energy in MAXI J1535-571 (ObsID: P0114535003)

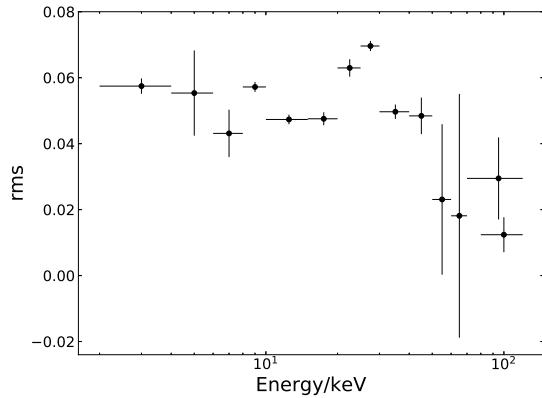


图4 MAXI J1535-571中 ν_b 以下的低频噪声成分的rms谱(观测号: P0114535003)

Fig. 4 The rms spectrum of low frequency noise component below ν_b in MAXI J1535-571 (ObsID: P0114535003)

不同类型致密天体XRB符合相同的W-K关系, 表明在这些不同类型XRB中, 吸积盘的成分相似, 且非周期性的快速时变行为可能具有相同的物理机制. 对宽带噪声和QPO变化幅度的研究发现了在低硬态噪声rms高达50%的情况, 表明噪声不可能起源于标准的薄吸积盘^[35], 噪声的延迟性质也部分说明了这一点^[33]. 这些快速时变行为可能产生于非热辐射成分的内吸积流(冕). 对于噪声的形成机制, 人们建立了不同模型^[36]. 现在的主导模型则是物质吸积率扰动传播模型, 在此模型中质量吸积率波动由粘滞变化所传递, 远离黑洞的扰动调制趋于稳定并接近黑洞的吸积率. 因此, 内吸积流中不同位置处的扰动叠加形成我们观测到的PDS. 在这个模型中, 两个截断频率分别对应不同的吸积流特征半径, 低频截断频率 ν_b 和吸积流外半径 r_{out} (也就是吸积盘内半径)相关, 而高频截断频率 ν_h 则对应冕的内半径 r_{in} , 大于 ν_h 的噪声成分的幅度会迅速降低(如图1).

两个截断可能符合冕上的同一个粘滞频率公式^[37-38]. 我们对不同XRB的研究表明, 冕的分布是会变化的, 随着能谱拟合参数中温度的升高, 冕的外半径减小, 这和等离子体冕随着半径增加, 温度下降的认识一致. 我们的结果同时也表明, 冕内半径 r_{in} 在演化中保持稳定, 这可能表明 r_{in} 接近最内稳定轨道半径(R_{ISCO})^[39].

在此模型中, 随着黑洞吸积率的增加, 热内流冷却并收缩, 截断频率 ν_b 增加, 同时QPO频率 ν_{QPO} 增加, 呈现观测到的W-K关系. ν_b 和 ν_{QPO} 随着 r_{out} 变化的机制都可以用公式来表达, 在下面进行讨论.

4.2 吸积盘几何结构

在吸积扰动模型中, 位于吸积盘内部的热内流(冕)产生短时标扰动, 吸积盘具有一个相对更大的吸积半径. 暂现源的演化过程中, 随着吸积率的增加, 流量增加, 吸积盘内半径减小, 当源处于HSS时, 吸积盘达到 R_{ISCO} . 然而, 能谱分析结果显示^[40-42], 在LHS, 吸积盘也可能是非截断, 也即已经处于 R_{ISCO} , 这和截断盘的标准模型不一致. 这说明可能存在两类具有不同吸积盘结构的黑洞暂现

源, 另外也可能是现在的望远镜观测数据不足以区分不同的理论模型, 导致不同能谱模型的简并, 所以得到了不同的吸积盘结构^[41]. 综合利用X射线源的时变和能谱性质成为进一步研究吸积盘结构的途径^[30, 43-44]. 为此, 我们选择数据较丰富的MAXI J1535-571黑洞暂现源, 通过时变和能谱分析研究吸积盘结构及其演化.

Kong等^[26]和Huang等^[22]已经对此源进行了能谱分析, 本文直接借用他们的能谱参数计算吸积盘内半径. 假设吸积盘与热内流稳定衔接, 那么, 在吸积率扰动模型中, ν_b 应与热内流外半径 r_{out} 也就是吸积盘内半径反相关. 图5显示了MAXI J1535-571的 r_{out} 与 ν_b 的相关性^[35]. 统计上, 图5中截断半径和截断频率的确呈现反相关关系(其中不同颜色代表了不同探测器的 ν_b), 支持黑洞暂现源爆发态的截断吸积盘演化模型, 也即, 随着黑洞吸积率的增加, 吸积盘内半径缩小的物理图像. 同时我们也能看到, 不同的 ν_b 可以对应很相近的 r_{out} , 这可能说明能谱并没有很好反映吸积盘内半径的演化, 但大的演化趋势还是很清晰的.

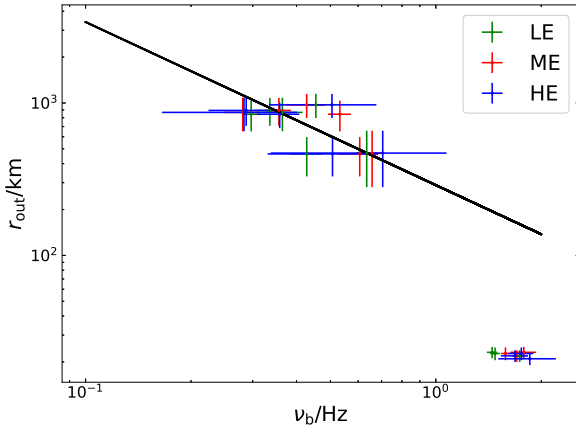


图 5 MAXI J1535-571中低频截断频率 ν_b 和热内流外半径 r_{out} 的相关关系. 图中黑色直线是(1)式对数据的拟合(右下数据未参与拟合, 原因见4.3节).

Fig. 5 Correlation between the low break frequency (ν_b) and the outer radius (r_{out}) of hot inner flow in MAXI J1535-571. The black line is the fit of data in Fig. 2 with Eq. (1) (Some data in low right is not included in this fit, the reason is shown in Sec. 4.3).

4.3 吸积盘内半径的计算和L-T相对论进动模型检验

热内流受粘滞影响以粘滞时标向黑洞运动, 和粘滞时标联系的粘滞频率由下式表述^[37-38]:

$$\nu_{\text{visc}} = \alpha \left(\frac{h}{r} \right)^2 \nu_k(r), \quad (1)$$

其中 ν_{visc} 是热内流上任意半径处的粘滞频率, α 为粘滞参数, $\frac{h}{r}$ 是半厚度(semithickness), h 为热内流厚度, r 为半径, ν_k 为粒子的开普勒频率. ν_b 为截断半径也就是 r_{out} 位置上的粘滞频率. 由于 $(\frac{h}{r})^2$ 和 ν_k 都是半径的幂律形式函数, 仅仅计算同一时间内吸积流上各处的粘滞频率和半径相关关系时, (1)式可以简化为 $r = B\nu_{\text{visc}}^\beta$, 其中 B 和 β 是这个幂律关系的参数. 对吸积流磁致不稳定性的模拟显示^[35], 热内流的 α 和 $\frac{h}{r}$ 都是 r_{out} 的函数. 我们假设 r_{out} 相近的一小段时间上内吸积流的粘滞性相关参数是近似不变的, 也就是符合相同的(1)式. 选择 r_{out} 、QPO频率均相近且时间上连续的曝光号数据分为一组, 用(1)式拟合图5中的数据. 由于在MAXI J1535-571中不同能段的 ν_b 变化相对其他黑洞来说不大, 而且本文中的截断半径由能谱拟合(慧眼-HXMT全能段)得到, 为了与之相统一和提高信噪比, 就把所有能段的数据一块拟合, 我们把3个探测器的数据联合拟合, 并且排除了截断盘可能已经到达最内稳定轨道而且没有高频截断的最右侧的3个观测号. 这样我们可以将图5中的数据点进行拟合, 考虑数据点在X、Y轴上的误差, 得到的公式参数为 $B = 289 \pm 88$, $\beta = 1.07 \pm 0.32$. 借用拟合公式和3个探测器的高频截断频率 ν_h , 可以计算热内流的内特征半径 r_{in} , 如图6所示.

如结果显示, 内吸积流的内半径变化较小(图6). 为此, 我们取图6中3个探测器数据计算出的内半径的平均值, 得到 $r_{in} = 26.7$ km. 按前人的论文取黑洞质量为10个太阳质量(M_\odot), 则 $r_{in} \sim 0.89R_g$, R_g 是黑洞的史瓦西半径. 在标准吸积盘模型中, 内吸积流经过 R_{ISCO} 后无法稳定存在并进入黑洞, 普遍认为高频截断频率产生的位置也接近ISCO. 对于极端Kerr黑洞, $R_{ISCO} \sim R_g$. 本文获得的 $r_{in} \sim R_{ISCO} \sim R_g$ 的结果和内吸积流模型以及

黑洞自旋 $a = 0.993$ 一致, 表明本文给出的 r_{in} 具有一定合理性.

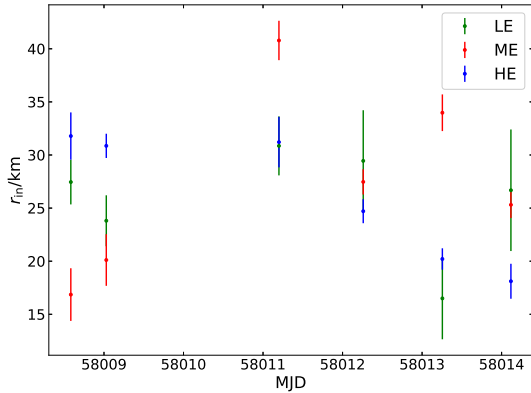


图 6 用 ν_h 和(1)式计算出的图5中参与拟合的观测号的 r_{in}

Fig. 6 The inner radius r_{in} calculated by ν_h and Eq. (1) in observations fitted in Fig. 5

借由上面的简化公式, 可以推论出内吸积流的内半径近乎不变, 根据计算出的 r_{in} 和其他的黑洞物理参数, 可以用公式分别计算截断频率和QPO频率. 在L-T相对论进动模型中^[35], QPO频率由下式决定:

$$\nu_{\text{QPO}} = \frac{(5 - 2\zeta)}{\pi(1 + 2\zeta)} \frac{a[1 - (r_{\text{in}}/r_{\text{out}})^{\frac{1}{2} + \zeta}]}{r_{\text{out}}^{\frac{5}{2} - \zeta} r_{\text{in}}^{\frac{1}{2} + \zeta} [1 - (r_{\text{in}}/r_{\text{out}})^{\frac{5}{2} - \zeta}]} \frac{c}{R_g}, \quad (2)$$

其中, a 为黑洞自旋因子, 热内流的面密度分布符合幂律因子为 ζ 的幂律函数, r_{in} 和 r_{out} 分别为热内流的内半径和外半径. 按照Ingram等人的模型^[35], 黑洞的热内流面密度不随着半径而改变, 设定 $\zeta = 0$, 假定热内流内半径 r_{in} 固定于26.7 km, QPO频率 ν_{QPO} 就可以当做 r_{out} 的函数来计算, 截断频率也同样, 因此我们可以画出理论上的W-K关系. 结果示于图7, 其中线是理论值构成, 数据点是前面图中给出的实际观测数据, 右上角的点没有参与图5中的拟合, 因此得到的理论曲线偏离了它们. 其他数据点与理论值的差异, 除了观测数据分析结果的粗糙, 也和公式参数过于简单的设置有关^[35]. 但趋势性的结果表明截断盘演化模型可以定性解释QPO产生和W-K关系.

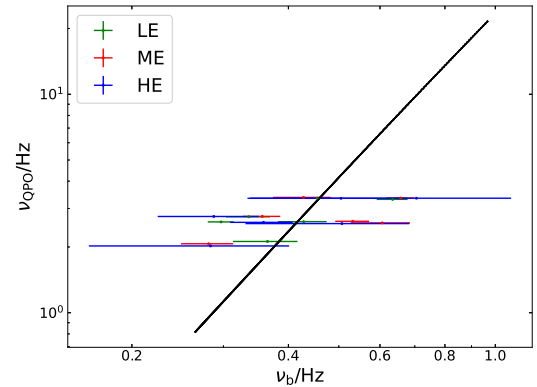


图 7 MAXI J1535-571的W-K关系. 黑色线是根据Ingram等^[35]的理论计算的W-K关系.

Fig. 7 The W-K correlation of MAXI J1535-571. The black line is the theoretical W-K correlation from Ingram et al.^[35].

5 结论

本论文利用慧眼-HXMT对5个黑洞候选体的观测数据, 在2–120 keV能段内研究了W-K关系及其能量依赖性. 在慧眼-HXMT 3个探测器的能量段内, 功率密度谱的低频截断频率 ν_b 没有显著的能量依赖性, 这和慧眼-HXMT以及NICER对MAXI J1820+070的观测结果较为一致. 慧眼-HXMT所给出的W-K关系与Wijnands等^[6]在3–20 keV所展示的结果一致. 为研究吸积盘结构, 我们将W-K关系应用到MAXI J1535-571暂现源中并利用能谱分析的成果, 结果显示MAXI J1535-571系统与截断吸积盘的模型一致. 我们检验了QPO与吸积盘结构的关系, 发现QPO频率与热内流的相对论进动模型一致. 为进一步探索X射线双星吸积盘的结构, 需要更多的观测样本.

参考文献

- [1] Shakura N I, Sunyaev R A. MNRAS, 1976, 175: 613
- [2] Remillard R A, McClintock J E. ARA&A, 2006, 44: 49
- [3] Homan J, Belloni T. Ap&SS, 2005, 300: 107
- [4] Done C, Gierliński M, Kubota A. A&ARv, 2007, 15: 1
- [5] Belloni T M, Motta S E. Astrophysics of Black Holes: from Fundamental Aspects to Latest Developments. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, 440: 61
- [6] Wijnands R, van der Klis M. ApJ, 1999, 514: 939
- [7] Remillard R A, Sobczak G J, Munro M P, et al. ApJ, 2002, 564: 962
- [8] Casella P, Belloni T, Homan J, et al. A&A, 2004, 426: 587

- [9] Motta S, Muñoz-Darias T, Casella P, et al. MNRAS, 2011, 418: 2292
- [10] Psaltis D, Belloni T, van der Klis M. ApJ, 1999, 520: 262
- [11] Belloni T, Psaltis D, van der Klis M. ApJ, 2002, 572: 392
- [12] Casella P, Belloni T, Stella L. ApJ, 2005, 629: 403
- [13] Ingram A, Done C, Fragile P C. MNRAS, 2009, 397: L101
- [14] Motta S E, Casella P, Henze M, et al. MNRAS, 2015, 447: 2059
- [15] Schnittman J D, Homan J, Miller J M. ApJ, 2006, 642: 420
- [16] Motta S E. AN, 2016, 337: 398
- [17] Stella L, Vietri M. NuPhS, 1999, 69: 135
- [18] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [19] Liu C, Zhang Y, Li X, et al. SCPMA, 2020, 63: 249503
- [20] Cao X, Jiang W, Meng B, et al. SCPMA, 2020, 63: 249504
- [21] Chen Y, Cui W, Li W, et al. SCPMA, 2020, 63: 249505
- [22] Huang Y, Qu J L, Zhang S N, et al. ApJ, 2018, 866: 122
- [23] Liu H, Ji L, Bambi C, et al. ApJ, 2021, 909: 63
- [24] Bu Q C, Zhang S N, Santangelo A, et al. ApJ, 2021, 919: 92
- [25] Liu H, Jiang J, Zhang Z, et al. MNRAS, 2022, 513: 4308
- [26] Kong L D, Zhang S, Chen Y P, et al. JHEAp, 2020, 25: 29
- [27] Nowak E. TSF, 2000, 377-378: 699
- [28] Miyamoto S, Kimura K, Kitamoto S, et al. ApJ, 1991, 383: 784
- [29] Arnaud K A. Astronomical Data Analysis Software and Systems V. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996, 101: 17
- [30] Kawamura T, Done C, Axelsson M, et al. MNRAS, 2023, 519: 4434
- [31] Yang Z X, Zhang L, Bu Q C, et al. ApJ, 2022, 932: 7
- [32] Bu Q, Belloni T M, Chen L, et al. ApJ, 2017, 841: 122
- [33] De Marco B, Zdziarski A A, Ponti G, et al. A&A, 2021, 654: A14
- [34] Ingram A, Mastroserio G, Dauser T, et al. MNRAS, 2019, 488: 324
- [35] Ingram A, Done C. MNRAS, 2011, 415: 2323
- [36] Ingram A, van der Klis M. MNRAS, 2013, 434: 1476
- [37] Fragile P C, Blaes O M, Anninos P, et al. ApJ, 2007, 668: 417
- [38] Ingram A, Done C. MNRAS, 2010, 405: 2447
- [39] Guan J, Tao L, Qu J L, et al. MNRAS, 2021, 504: 2168
- [40] Ren X Q, Wang Y, Zhang S N, et al. ApJ, 2022, 932: 66
- [41] Zdziarski A A, De Marco B, Szanecki M, et al. ApJ, 2021, 906: 69
- [42] Buisson D J K, Fabian A C, Barret D, et al. MNRAS, 2019, 490: 1350
- [43] Dzielak M A, De Marco B, Zdziarski A A. MNRAS, 2021, 506: 2020
- [44] Feng Y, Steiner J F, Ramirez S U, et al. MNRAS, 2023, 520: 5803

The W-K Relation in Black Hole X-ray Binaries from *Insight*-HXMT Observation

MA Bin-yuan^{1,2} YANG Zi-xu^{1,2} LIAO Jin-yuan² QU Jin-lu^{1,2}

(1 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Through decades of observations and studies, the characteristics of black hole X-ray binaries (XRBs) have been gradually revealed. However, the structure of the accretion disk remains uncertain. In the power density spectrum of the BHXR (Black Hole X-ray Binaries), there is a correlation between the break frequency and the quasi-periodic oscillation (W-K relation), and it can constrain the current model of accretion disk. The W-K relation in black hole XRBs is studied based on the observations of five black hole XRBs by *Insight*-HXMT (Hard X-ray Modulation Telescope). The result shows that the W-K relation is valid in all the three telescopes with different energy bands. Moreover, a correlation between the break frequency and the inner radius of the accretion disk is found for MAXI J1535-571, which is self-consistent with the model of a truncated accretion disk. If the observed power density spectra result from the propagation of perturbation in mass accretion rate, it can be further inferred that the inner radius of the accretion disk is close to the innermost stable circular orbit and the black hole might be a high-spin system.

Key words X-ray: binary, relativistic processes, accretion disk, radiation mechanisms: general